

고 토크밀도를 위한 다양한 회전자 형상의 외전형 영구자석 동기전동기에 관한 연구

차진욱, 권병일
한양대학교

A Study on Various Rotor Shape of Outer Rotor Permanent Magnet Synchronous Machine for High Torque Density

Jin-wook Cha, Byung-il Kwon
Hanyang University

Abstract - 본 논문에서는 외전형 영구자석 동기전동기(Outer rotor Permanent Magnet Synchronous Motor)의 회전자 형상에 따른 토크특성을 비교하였다. 표면부착형 영구자석(SPM) 형태의 FAN용 PMSM을 설계하고 이 모델을 기준으로 동일한 외경사이즈를 갖지만 더 높은 토크 밀도를 갖는 4가지 매입형 영구자석(IPM) 형태의 PMSM을 제시한다. Finite Element Analysis(FEM)을 통하여 각 모델의 특성을 해석하고 자석 사용량과 토크를 비교 및 분석하였다.

1. 서 론

기계적으로 단순한 구조를 위하여 직접구동방식을 위해 설계되는 많은 전동기들이 외전형 타입으로 설계되고 있다. 외전형 전동기는 내전형 전동기와 비교했을 때 회전하는 회전자 부분이 외부에 존재하는 특징을 가지고 있어 적은 토크에도 많은 출력을 얻을 수 있어 전동기의 소형화에 유리하다. 뿐만 아니라 전동기의 직경이 넓어짐에 따라 더 넓은 공간을 확보 할 수 있으므로, 자석의 사용량을 늘리거나 폭 및 길이 등을 자유롭게 조절 할 수 있는 장점이 있다. 표면부착형 영구자석 전동기인 경우 내전형 전동기는 구조적으로 고속 회전 시 영구자석이 회전자 표면으로부터 떨어질 수 있는 단점이 있으나, 외전형 전동기는 이러한 영구자석의 비산이 비교적 적은 강점을 갖는다. 또한 회전자에 직접 회전파트를 장착시키는 직접구동방식을 취할 수 있기 때문에 구조적으로 단순화시킬 수 있어 팬 용 전동기나 환풍기용 전동기 혹은 In-wheel 전동기에 주로 적용된다. [1]

또 다른 분류로 산업분야에서 주로 사용되고 있는 PMSM 전동기의 경우 크게 회전자 표면에 영구자석이 부착되는 표면부착형 (Surface mounted Permanent Magnet) 영구자석 타입과 영구자석을 회전자 철심에 매입한 매입형 (Interior Permanent Magnet) 영구자석 타입으로 나눌 수 있다. IPM 영구자석 타입은 기계적으로 강한 회전자 구조를 갖고 d, q축 인덕턴스 차이에 의해 발생한 릴럭턴스 토크와 마그네틱 토크와 결합하여 단위 체적 당 발생하는 토크가 크다. 따라서 출력 대비 영구자석 사용량을 줄이는 것이 가능하다. [2]

본 논문에서는 이러한 외전형 매입형 영구자석 타입의 장점을 이용하여 4가지 외전형 회전자 영구자석 형상을 설계하였다. 각각의 IPM 전동기 모델들을 외전형 SPM 전동기와 영구자석 사용량 및 성능을 비교, 분석하였다.

2. 본 론

2.1 외전형 SPMSM 전동기 기본모델 설계

그림 1은 비교 기준으로 잡은 Fan용 외전형 SPMSM 전동기의 1/4 해석 모델이다. 코깁토크와 토크리플의 최소화에 적합한 극/슬롯 조합을 갖는 16극 12슬롯의 구조를 가지고 있고, 권선사양은 엔드코일을 최소화 하고 점적플에 이점이 있는 3상 집중권을 사용하였다. SPMSM은 영구자석의 전기자 쇠교자속의 변화에 의한 토크인 마그네틱 토크(Magnetic Torque)만이 토크 발생에 관여한다.

표 1은 그림 1 모델의 구체적인 사양이다. 정격 속도는 1000 [rpm], 전체 외경 사이즈는 81[mm]이다. 영구자석의 Parallel 방향 작차로 인하여 역기전력 파형이 정현파이고, 이에 따라 구동 방식은 정현파 구동전류를 인가한다.

기준모델 전동기의 설계는 다음의 설계 특성 식을 이용하여 설계하였다. 1극의 자속의 평균 단면적 및 길이는 각각 다음의 식으로 주어진다.

$$a_m = \frac{1}{2} \psi L_m (D+t_r) = \frac{\pi \alpha_i}{2p} L_m (D+t_r), l_m = t_r \quad (1)$$

D : 자석계자의 내경, t_r : 동축방향 두께(자석의 자화방향 길이 l_m)

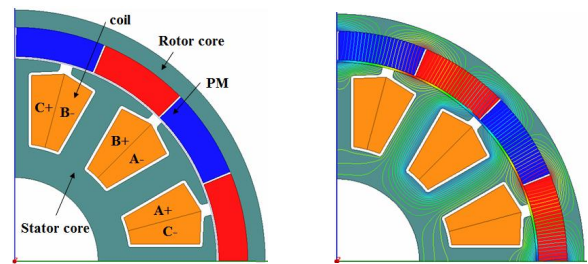
ψ : 동자극 각도, L_m : 동축방향 길이, l_g : 공극 길이

D_a : 전기자철심의 외경, L_a : 동축방향 길이, p : 극쌍수

$\alpha_i = p\psi/\pi$: 극효율

전기자철심의 형상 치수비를 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{L_a}{D_a} = \frac{2a_m}{k_f \psi (D_a + l_m + 2l_g) D_a} \quad (2)$$



(a) 기본모델 형상 (b) 자속선도
〈그림 1〉 Fan용 외전형 SPMSM 전동기 1/4 해석모델

〈표 1〉 기본모델 설계사양

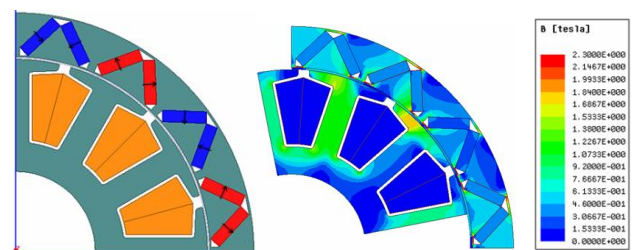
| 항 목 | 사 양 | 항 목 | 사 양 |
|--------|-----------|---------|---------------------|
| 출 령 | 56 [W] | 정격속도 | 1000 [rpm] |
| 극 수 | 16 [극] | 슬롯 수 | 12 [슬롯] |
| 회전자 외경 | 81 [mm] | PM 두께 | 4.7 [mm] |
| 고정자 외경 | 65.2 [mm] | 권선 직경 | 0.25 [mm] |
| 고정자 내경 | 28 [mm] | 상 당 턴 수 | 347 [턴] |
| 공극 길이 | 0.4 [mm] | 상 당 저항 | 61.21 [Ω] |
| 적층 길이 | 25 [mm] | 영구자석 | Ferrite(Br:0.43[T]) |

2.2 외전형 IPMSM 전동기 비교모델 설계

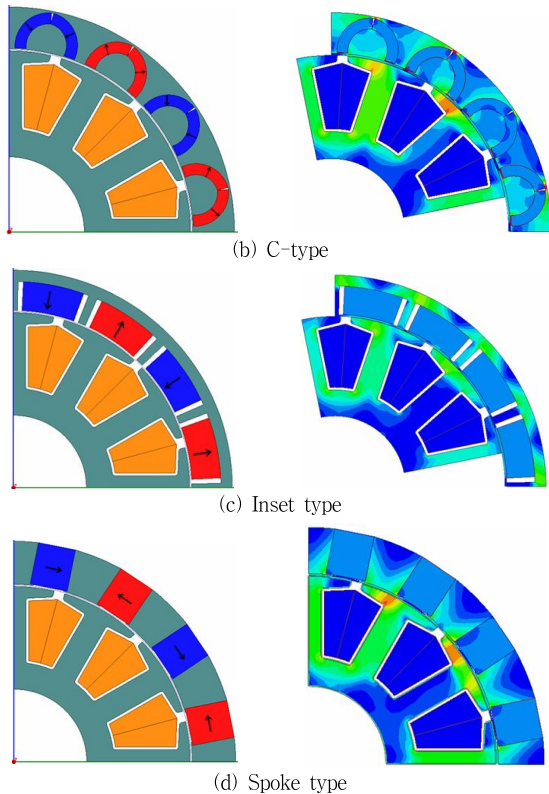
본 논문에서는 자석사용량 대비 고 토크를 얻기 위하여 그림 2와 같이 4가지 외전형 IPMSM 전동기 모델을 제시하였다. 표 2에 나타난 대로 고정자 형상, 턴 수 및 구동전류는 모두 기준모델과 동일한 조건하에 설계되었고, 회전자의 영구자석 형상과 영구자석 사용량만 다르게 설계하였다. 또한 동일한 페라이트 영구자석과 전체 외경사이즈를 같게 제한함으로써 성능 비교를 용이하게 하였다.

〈표 2〉 SPM 기본모델과 4가지 IPM 비교모델의 설계 기준

| 구 분 | SPM | V-type | C-type | Spoke | Inset |
|-----------|-----|-------------------------|--------|-------|-------|
| 회전자 외경/내경 | | 81 [mm] / 66 [mm] | | | |
| 권선방식 | | 3상 집중권 | | | |
| 영구자석 | | Ferrite (Br : 0.43 [T]) | | | |
| 회전속도 | | 1000 [rpm] | | | |



(a) V-type



〈그림 2〉 외전형 IPMSM 전동기 설계 모델 및 자속분포도

2.3 비교모델의 해석결과 및 특성 비교

그림 2에 각각의 비교 모델과 자속분포도를 나타내었다. 영구자석은 정현파 역기전력을 얻기 위하여 화살표방향으로 Parallel 착자하였고 그림 3에서 각 모델별로 Back-EMF 파형을 나타내었다.

IPM 타입의 4가지 비교 모델들은 높은 토크밀도를 얻기 위하여 SPM 기본 모델보다 더 적은 영구자석 사용량을 갖도록 설계하였다. 이를 보상하기 위하여 영구자석에서 발생하는 자속을 집중시킬 수 있도록 영구자석을 배치하고(V-type, C-type, Spoke type), 자기적 돌극성에 의한 릴럭턴스 토크(Reluctance Torque) 성분을 이용할 수 있도록 하였다.

표 3에 각 모델별로 특성해석 결과를 정리하였다.

2.3.1 V-type

영구자석이 “V”형태로 매입되어 있는 자속 집중형 회전자 형상이다. 영구자석 양 끝단에서 누설이 발생되지만 누설을 최소화하기 위하여 베리어(Barrier)를 설치하고 베리어와 공극사이의 코어의 두께를 제작성을 고려하여 최대한 얇게 설계하였다(0.4 [mm]). 사용된 영구자석의 두께는 2 [mm]이고 영구자석이 기본 모델의 영구자석보다 47[%]가 적게(57.6 [g]) 사용되었음에도 불구하고 쇠교자속에 의한 역기전력이 기본 모델보다 2.2 [%] 증가하였다.

2.3.2 C-type

V-type과 비슷한 자속 집중형 형태를 가지고 있지만 자속이 나오는 표면을 직선형 영구자석보다 증가시키기 위해 곡면의 C-type의 영구자석을 사용하였다. 영구자석과 공극사이의 코어 두께는 0.4[mm]이고, 영구자석은 66.88 [g]이 사용되었다. V-type보다 영구자석의 사용량과 자속 발생 면적이 증가함에 따라 쇠교자속에 의한 역기전력은 80.1 [V]로 기본 모델보다 13.9 [%] 증가하였다.

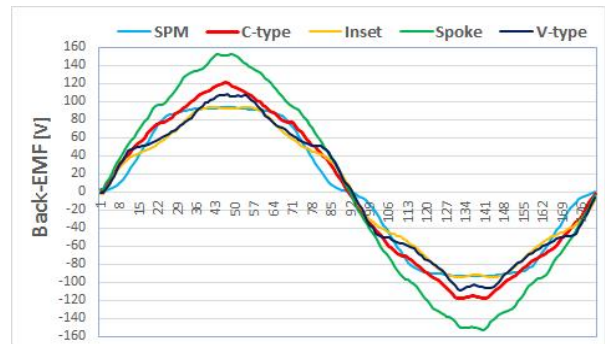
2.3.3 Inset type

Inset type은 자속이 집중되는 회전자 형상을 갖고 있지 않지만 영구자석에 의해 발생하는 마그네틱 토크와 q축 방향과 d축 방향의 자기저항 차에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크를 같이 이용하기 위하여 표면에 영구자석을 끼워 넣었다. 하지만 릴럭턴스 토크가 영구자석 사용량이 줄어든 만큼 줄어든 마그네틱 토크에 영향을 미칠 만큼 크게 발생하지 않았다. 따라서 역기전력이 66.5 [V]로 기본 모델과 비교했을 때 5.6% 감소한 것을 확인하였다.

2.3.4 Spoke type

Spoke type은 설계된 회전자 형상 특성상 가장 자속이 집중이 잘되고 자속이 누설되는 코어부분이 없기 때문에 다른 IPM 모델과 SPM 타입

기본 모델 보다 높은 역기전력이 발생했다. 104.2 [Vrms]로 기본모델보다 48% 가량 높게 나타났다. 또한 회전자 코어에서 국부적으로 포화가 일어나지 않기 때문에 집중된 자속이 누설 없이 모두 공극을 통과하여 토크발생에 기여하는 것을 확인할 수 있었다.



〈그림 3〉 각 모델들의 역기전력

〈표 3〉 각 모델별 특성해석 결과

| 구분 | SPM | V-type | C-type | Inset | Spoke |
|----------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| 역기전력 | 70.28 [Vrms] | 71.8 (↑2.2%) | 80.1 (↑13.9%) | 66.5 (↓5.4%) | 104.2 (↑48%) |
| 코깅 토크 | 153.4 [mNm] | 40.5 | 37.7 | 81.2 | 339.5 |
| 토크 | 539.7 [mNm] | 568.3 | 623.0 | 512.6 | 794.0 |
| 토크 리플 | 28.9 [%] | 29.3 | 21.8 | 17.4 | 30.1 |
| 토크 / 자석량 | 4.4 [mNm / g] | 9.86 (↑123%) | 9.31 (↑111%) | 4.85 (↓5.9%) | 7.52 (↑70%) |
| 영구자석 사용량 | 122.4 [g] | 57.6 | 66.88 | 105.6 | 105.6 |

3. 결 론

본 논문에서는 기존에 설계된 외전형 SPMSM보다 영구자석 사용량을 줄이고 더 높은 토크를 위한 4가지의 IPMSM 모델을 제시하였다. 동일 외경사이즈와 고정자 코어를 사용한 각각의 모델에 대한 특성은 2D-FEM을 통하여 비교 및 분석하였다.

Inset type을 제외한 V-type, C-type, Spoke type 모두 영구자석 사용량을 줄였음에도 더 높은 토크를 발생시키는 것을 확인하였다. Spoke type이 자속의 집중과 적은 누설 자속에 의해 다른 IPMSM 모델보다 고 토크를 발생시킨다.

V-type과 C-type은 적은 양의 영구자석을 사용했음에도 높은 토크/영구자석 사용량을 갖는 것으로 나타났다. 또한 V-type과 C-type은 다른 모델들 보다 다양한 설계 변수를 가지고 있으므로 최적설계를 통하여 설계목표를 달성할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 외전자 회전자 구조 특성상 영구자석 배치를 위하여 영구자석의 두께가 얇아지므로 감자의 위험을 줄일 수 있도록 개선이 필요하다.

외전형 IPM 구조도 내전형 IPM 구조보다는 공간적 자유도가 낮지만 자속 집중을 통한 높은 토크밀도를 얻을 수 있었고, 각 모델의 최적의 형상 설계와 정적 출력, 효율 등의 목적을 충족시키기 위한 상세 설계를 추후에 진행할 계획이다.

This work was supported by the Human Resources Program in Energy Technology of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (20154030200730) and Mid-career Researcher Program through the National Research Foundation of Korea grant funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2013R1A2A2A01068022).

[참고 문헌]

- [1] Qian Chen, Guohai Liu, Longgang Sun, Yicheng Jiang, and Junqing Yang, "Comparison of Five Topologies Rotor Permanent Magnet Motors with Improved Fault-Tolerance", Magnetics, Vol. 47, pp. 3606-3609, 2011
- [2] 이태용, 이진환, 정상용, "페라이트 자석을 사용한 외전형 영구자석 동기전동기의 회전자 형상별 토크 특성 분석", 대한전기학회 추계학술대회, 2013